C310 TUNELY POD TEMZÍ
CROSSRAIL C310 THAMES TUNNEL

RIKU TAURIAINEN, RAINER RENGSHAUSEN, ANDREAS RAEDLE

ABSTRAKT

Projekt Crossrail byl v časopise Tunel již několikrát zmiňovaný, a proto zde není třeba ho znovu popisovat z celkového pohledu. Uváděný příspěvek se věnuje samostatné části projektu Crossrail, která nese označení C310 – Tunely pod Temží. Projekt C310 se nachází ve východní části Londýna v oblasti Woolwich a společnost HOCHTIEF jej realizovala v horizontálním sdružení se společností Murphy. Jedná se o velice zajímavou tunelovou stavbu raženou kombinovanými štíty s řadou technických aspektů, se kterými se bylo nutno v průběhu přípravy i realizace stavby vypořádat. Zejména šlo o posouzení rizik optimální volby stroje vhodného do specifických a velmi složitých podmínek ražby a proces separace vytěženého materiálu. Úsek C310 spojuje portálové oblasti Plumstead a North Woolwich dvěma tubusy budoucí železnice, jejichž délka je přibližně 2,6 km a vnitřní průměr každého tunelu je 6,2 m. Úsek C310 byl ražen dvěma stejnými štíty s vnějším průměrem 7,12 m, každý razil jednu tunelovou troubu a jejich vzájemný odstup byl přibližně 3 měsíce. Maximální dosažený týdenní postup byl 156 m. Sdružení Hochtief – Murphy získalo za tento projekt ocenění „Green Line Award" za dodržení vysokého standardu vlivu stavby na životní prostředí v průběhu realizace.

ABSTRACT

General information about the Project Crossrail have been published in periodical Tunel many times so due to this fact there is no need for another description of the project from its global point of view. This paper is aimed to standalone part of the Crossrail Project called C310 – Thames tunnel. HOCHTIEF Murphy Joint Venture (HMJV) was responsible for the construction of two tunnels underneath the River Thames, under the contract name C310 Thames Tunnel. C310 is a challenging project excavated by two mixed shields with a few technical aspects which have to be handled during the preparation phase and during the realisation of the project. The most important aspects were especially risk evaluation process for optimal machine election for excavation in very difficult and specific geotechnical behaviour and separation process of excavated material. The contract C310 comprises the construction of both the Plumstead and North Woolwich Portals, as well as the twin tube Thames Tunnel which has a length of approximately 2.6km between the two portals and inner diameters of tunnel tubes are 6.2m. Section C310 has been excavated by two mix shields with outer diameter 7,12m, each shield for one tunnel tube. First shield started approximately 3 months before the second shield. Hochtief – Murphy JV received a 'Green Line award' for reaching Crossrail's high standard of environmental engagement.

ÚVOD A ZÁKLADNÍ INFORMACE O PROJEKTU

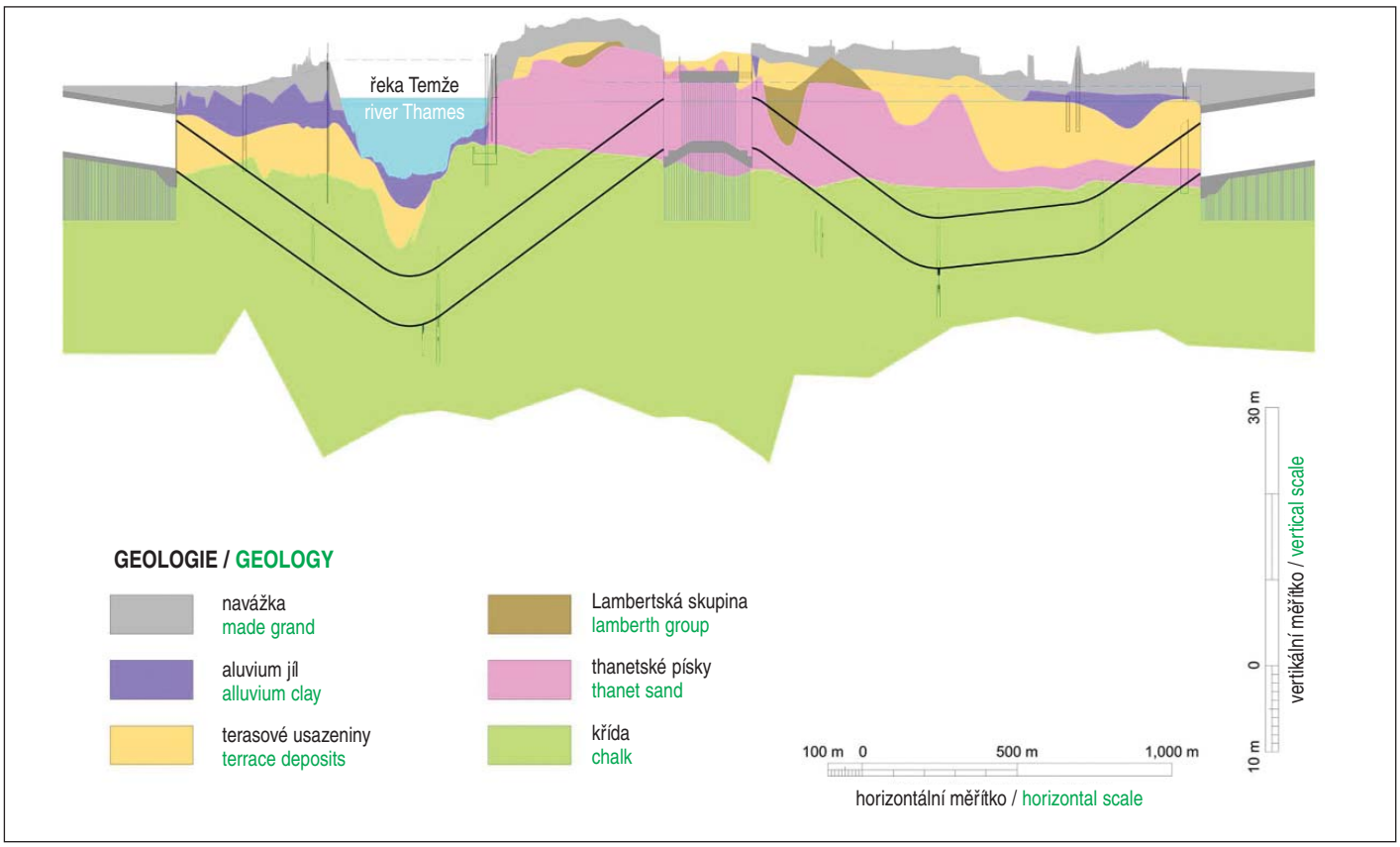
Termín zahájení prací na kontraktu označeném C310 byl podle smlouvy plánován na začátek března roku 2011. Výstavba tunelového portálu Plumstead začala v listopadu roku 2011. Startovací jáma byla přibližně 500 m dlouhá a hluboká byla 20 m. Byla zajištěna podzemními stěnami a převrtávanými pilotovými stěnami. V důsledku vysoké hladiny podzemní vody v okolí stavební jámy vyžadovala stavba speciální odvodňovací opatření v průběhu realizace s cílem dočasné úpravy vodního režimu. Na trase bylo třeba vybudovat další trvalé, případně dočasné otevřené stavební jámy půdorysných rozměrů od 4,5 do 25 m s hloubkou do 15 m (pro výstavbu propojek, výměnu řezných nástrojů, atd.). Tyto konstrukce byly stavěny buď za pomocí kesonů jako kruhové šachty pažené segmentovým ostěním, případně zapaženy štětovnicovými stěnami nebo převrtávanými pilotovými stěnami. Samotné ražby byly zahájeny v lednu 2013 a předpokládané dokončení ražeb včetně propojek a čerpacích jímek bylo v září 2014. Sdružení tento termín splnilo. Dokončení veškerých prací proběhlo v průběhu roku 2015.

C310 byl náročný projekt jak technicky, tak provozně, a to kvůli umístnění stavby do centra města a složitým geotechnickým podmínkám. Ražba probíhala v proměnlivých geologických podmínkách (thanetský písek, sedimenty říční terasy /štěrk/ a křída /měkká karbornátová sedimentární hornina/) pod hladinou podzemní vody (obr. 1). Pod řekou Temží mají tunely nadloží pouze přibližně 12 m. Řízení tunelovacích prací muselo brát v úvahu působení změn tlaku souvisejících s přílivem a odlivem na řece Temži. Dále byla ražba pod řekou Temží určována často silně porušenou a zvětralou křídou, vrstvami terciérních písků a kvartérními fluviálními sedimenty. Tunel prochází pod několika památkově

INTRODUCTION AND BASICAL INFORMATION ABOUT THE PROJECT

Contract commencement date was in early March 2011; in November 2011 the construction of the tunnel portal at Plumstead commenced. The launch and reception shafts for the TBMs comprise cut and cover approach structures of approximately 500m in length and 20m in depth which were constructed by diaphragm walling, secant, rotary bored and CFA piling. Due to the high water table, variable ground conditions and adjacent assets, the excavations required substantial temporary supports and extensive dewatering schemes with recharge. Other temporary and permanent shafts (due to the cross passages construction, possible change of excavation tools, ...) were constructed with sizes ranging from 4.5 to 25m and depths of up to 15m. These have been constructed by wet caisson techniques with precast segmental linings, sheet piling and secant piling. The main tunnelling works started in January 2013 and the anticipated completion of the tunnelling work including cross passages and pump sumps is September 2014, which was met by the Joint Venture. Completion of the whole works was as expected mid June 2015.

C310 is a challenging project, both technically and operationally, due to its location and difficult geotechnical conditions. The two TBMs will drive through varying ground conditions (Thanet Sand, River Terrace Deposit (Gravel), and Chalk) below the water table (see Figure 1). During the drive under the River Thames, the tunnels will only have an overburden of approximately 12m. The effect of pressure variation due to the tidal River Thames has to be accounted for in the



Obr. 1 Schématický podélný geologický profil
Fig. 1 Schematic geotechnical longitudinal section

chráněnými budovami stupně II (budovy zvláštního zájmu, u nichž je třeba zaručit dosažení veškerého úsilí k jejich ochraně), inženýrskými sítěmi, bezprostředně podél provozovaných železničních tratí a poblíž stávajících tunelů metra.

GEOTECHNICKÉ A HYDROGEOLOGICKÉ POMĚRY

Zjištěné (zastižené) kvartérní sedimenty říční terasy lze popsat jako středně až velmi propustné, šedohnědé nebo tmavě šedé, lehce prachovité, slabě jílovité štěrky, s příměsí jemného až hrubého písku a jemným až hrubým polozaobleným až zaobleným pazourkovitým štěrkem. Podíl frakcí je proměnlivý od štěrkovitého písku až po písčitý štěrk. Příležitostně se v něm nacházejí i kamínky křemence a pazourky.

Thanetský terciérní písek je převážně souvrstvím jemnozrnného písku ve vyšších polohách a písku se zvýšeným obsahem jílů v bazálních vrstvách. Nezvětralé souvrství je šedé až hnědošedé, přechází do světle nažloutlé šedé barvy. Podložní vrstvy Bullhead Bed jsou tvořeny slepencem ze zaoblených hrubých pazourkovitých valounů a pecek v tmavě zeleno-šedém jílovito-písčitém tmelu. Popisuje se jako propustný až velmi propustný.

Přibližně 80 % příčného řezu tunelu C310 se nachází v křídě. Křída se obecně považuje za slabě zpevněnou sedimentární horninu s velmi nízkou pevností tvořenou bílým vápencem ze zbytků schránek submikroskopického planktonu. Na rozdíl od mnoha vápenců je na území Velké Británie křída velmi rozšířená, a to v důsledku svého ryze planktonického původu. Dva rysy, které je v křídě běžně možné nalézt, jsou pazourky a slínové oblasti. Pazourek je mikrokrystalická křemenná hornina, která se objevuje rozptýleně, obvykle ve formě černých pecek nebo deskovitých pásů či ploch. Pazourky jsou velmi tvrdé a křehké a kontrastují tak s poměrně slabě zpevněnou matricí křídy. Slínové oblasti jsou místa se zvýšenou koncentrací jílu.

control of the tunnelling. Additionally, the drive under the River Thames is characterized by fissured and weathered Chalk and layers of discontinued sediment discharge. The tunnel will pass underneath several grade II listed buildings, utilities, adjacent to operational railway tracks and close to existing subway tunnels.

GEOTECHNICAL AND HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS

The encountered River Terrace Deposits (Gravel) are typically described as: medium dense to very dense, grey (orange or green) brown or dark grey, slightly silty, slightly clayey, fine to coarse sand and fine to coarse subangular to rounded flint gravel. The sand and gravel proportions varied from very gravelly sand to sandy gravel. Quartzite and flint cobble are found occasionally.

The Thanet Sand is predominately a sequence of coursing upward fine-grained sand, with higher proportions of clay and silts in the lower part. The unweathered formation is grey to brownish grey, and at the surface it weathers to a pale yellowish grey. The basal Bullhead Bed is a conglomerate comprised of rounded coarse flint gravels and nodular flints in a matrix of dark greenish grey, clayey fine to coarse grained sand. It is described as dense to very dense.

Approx. 80% of the C310 tunnel cross section is located in chalk. Chalk is generally considered to be a soft/weak rock, very pure white limestone formed from the skeletal remains of submicroscopic algae. However, unlike many limestones, chalk is very widespread as a consequence of its entirely planktonic origin. Two features commonly found in Chalk are flints and marl seams. Flint is a microcrystalline silicarock that occurs as dispersed, usually black nodules or as tabular bands or sheets. Flints represent very strong, brittle inclusions in contrast to the comparatively weak host Chalk matrix. Marl seams are horizons with increased concentrations of clay.

Obr. 2 Startovací jáma v oblasti západního portálu Plumstead
Fig. 2 Launching shaft at the location of west Plumstead portal

Tunel C310 prostupuje dvěma různými souvrstvími křídy – Haven Brow Beds a Cuckmere Beds. Svrchní partie souvrství je nesoudržná, silně zvětralá a je možné ji popsat jako bílou křídu nízké objemové hmotnosti, jejíž pevnost i objemová hmotnost se zlepšují s hloubkou. Inženýrskogeologické třídy křídy jsou v rozpětí od A do Dc. Třída křídy A1 je považována za nejvyšší kvalitu horniny a třída Dm je považována za nejhorší kvalitu horniny. CIRIA 574 zavádí obecný postup pro klasifikaci křídy v závislosti na objemové hmotnosti, výskytu a vzdálenosti ploch nespojitosti.

V oblasti Londýna jsou dvě zvodně. Hlavní, hluboká zvodeň se nachází v souvrství křídy a druhá, mělká zvodeň v sedimentech říční terasy.

Ve východní části Londýna jsou tyto dvě zvodně v hydrostatickém kontaktu přímo u C310 – Tunel pod Temží. Byl sledován pohyb hladiny podzemní vody v různých vzdálenostech od řeky Temže související se změnami její hladiny vlivem přílivu a odlivu. Minimální a maximální úrovně řeky byly odvozeny z hydrogeologického sledování. Maximum je stanoveno na výšku 104,5 m a minimum na 96,5 m nad srovnávací rovinou. V bezprostřední blízkosti řeky Temže je tedy možné identifikovat odchylky ± 4 m od průměrné úrovně podzemní vody 100,5 m nad srovnávací rovinou.

Kolísání HPV je způsobeno vlivem přílivu a odlivu ± 3,5 m. Zbytek vytyčené trasy tunelu má přednastavenou odchylku ± 1 m. Kromě hodnot poskytnutých zadavatelem se uskutečnila ještě další sledování. Byla prověřena dlouhodobá měření a průběžné odečty piezometrických měření po dobu 4 týdnů. S těmito informacemi byly definovány tři projektové úrovně podzemní vody. Tyto úrovně ukazují pórový tlak vody ve stávající zvodni. Pomocné výpočty tlaku byly provedeny za použití těchto tří uvažovaných úrovní.

RAŽBY PROVÁDĚNÉ V OKOLÍ CITLIVÝCH OBJEKTŮ A OVLIVNĚNÉ PŘÍLIVEM A ODLIVEM

Startovací jáma pro TBM s nízkým nadložím v bezprostřední blízkosti provozované železniční trati North Kent Line

Hned po prorážce milánských stěn u portálu Plumstead probíhala ražba štíty v ochranném pásmu Network Rail. Každý z nich se po dobu přibližně 36 kalendářních dnů razil v těsné blízkosti provozované železniční trati North Kent Line, pod silničním mostem White Hart a u elektrické rozvodny Cathedral Substation (obr. 2). Příčný řez tunelu je zde situován ve smíšených geologických podmínkách (štěrk, thanetský písek a křída) s nízkým nadložím přibližně 7 až 10 m v prvních 150 m ražby.

Two different chalk layers are hit by the C310 tunnel the Chalk of the Haven Brow Beds and the Cuckmere Beds. The Chalk is at the top of the layer very weak, highly weathered and described as low density white chalk improving in both strength and density with depth. The geotechnical and geological gradings of the chalk have a range from A to Dc. Chalk Engineering Grade of A1 is considered to be the highest rock mass quality, with Dm considered to be the worst rock mass quality. The CIRIA 574 introduces a general procedure for the chalk grading depending on the density, discontinuity aperture and discontinuity spacing.

There are two aquifers within the London area. The main deep aquifer is located in the Chalk Group whereas the River Terrace Deposits contain the second, shallow aquifer.

In the eastern part of London these two aquifers are in hydrostatic contact alos at C310 Thames Tunnel. A response to the tidal motion of the River Thames was observed, depending on the distance to the river. There is a minimum and maximum water level were derived from the geotechnical investigations. The maximum is set at 104.5m ATD whereas the minimum is set at 96.5m ATD (ATD- above Tunnel datum). The variation of ± 4m to the average groundwater level of 100.5m ATD can be found in close proximity to the River Thames.

This is due to the ± 3.5m tidal influence. The rest of the tunnel alignment has a pre-set variation of ± 1m. Besides of the values given by Crossrail, further investigations took place. The long-term measurements were reviewed plus continuous reading of piezometer measurements over a time period of 4 weeks. With this information the three design water levels were defined. These design levels indicate the pore water pressure in the present aquifer. The support pressure calculations were carried out using these three design levels.

TBM TUNNELLING UNDERNEATH SENSITIVE STRUCTURES AND BUILDINGS AND WITH TIDAL INFLUENCE

TBM Launching in close proximity to Operational North Kent Line with low overburden

Directly after cutting through the diaphragm walls at Plumstead Portal the TBMs are excavating in Network Rail's zone of influence each for a duration of approx. 36 calendar days close/adjacent to operational North Kent Line and underneath White Hard Road Bridge and Cathedral Substation (see Figure 2). The tunnel cross section is here located in Mixed-Face Conditions (Gravel, Thanet Sand and Chalk) with low overburden of approx. 7 to 10m for the first 150m of tunnelling.

Real-Time Monitoring devices consisting of ATS and prisms on the railway and hydrostatic levelling cells on the Bridge and the Cathedral Substation were installed. The HMJV monitoring system, Advanced Tunnel Drive Steering (ATDS), is collecting any movement and/or potential settlement on an ongoing 24/7 basis and showing the data in real time.

For the commencement of the tunnelling works a so called LONO (Letter of no objection) is required from Network Rail otherwise it is not allowed to start tunnelling. The settlements are to be minimised and support pressure has to be controlled in a safe and robust manner to get confidence from Network Rail and demonstrate assurance. This point was very important for Network rail, that there is no possibility of collapse occurrence at the beginning of excavation works.

Na železnici bylo nainstalováno monitorovací zařízení schopné provádět monitoring v reálném čase, skládající se ze systému řízení tunelových ražeb a optických hranolů a hydrostatických měřicích buněk na mostě a u rozvodny Cathedral Substation. Monitorovací systém sdružení HMJV (Hochtief Murphy Joint Venture) – Advanced Tunnel Drive Steering (ATDS) je pokročilé řízení tunelových ražeb – sbírá údaje o veškerém pohybu a/nebo možném sedání nepřetržitě 24 hodin, 7 dní v týdnu a zobrazuje je v reálném čase.

Podmínkou pro zahájení tunelovacích prací bylo tzv. vyjádření bez námitek (LONO/Letter Of No Objection) od společnosti Network Rail (provozovatel přilehlé železniční trati). Bez tohoto vyjádření nebylo dovoleno začít s ražbami. Muselo být minimalizováno sedání a podpůrný tlak na čelbě musel být regulován bezpečným a jednoznačným způsobem tak, aby se provozovatel trati Network Rail přesvědčil o bezpečném zajištění celého řídicího procesu ražeb. Tím byl také ujištěn, že nemůže dojít k výjimečné situaci hned se započetím tunelovacích prací.

Ražby pod/nad citlivými existujícími objekty

Trasa tunelu prochází pod dalšími citlivými objekty (kanalizační stoka Southern Outfall, budovy Royal Mail Building a Middlegate House) i nad nimi (železniční tunel Docklands Light ve světlé vzdálenosti přibližně 2 m). Aby se předešlo sedání, jež je způsobené tunelovacími pracemi, byla naprojektována kompenzační injektáž pod rozvodnou Cathedral Substation a pod budovou Middlegate House a následně zrealizována nezávisle na typu použitého stroje. Nejvýznamnější úpravou prošel silniční most White Hart, který se nachází západně od hlavního staveniště u Plumsteadu, přibližně 40 m od čelní stěny. Aby se zmírnilo sedání způsobené vlivem ražeb, musely být základy mostu upraveny. Úprava spočívala v podchycení základů mostu mikropilotami a uchycení základů zemními kotvami.

Ražby pod řekou Temží ovlivněné přílivem a odlivem

V této oblasti musí být bráno v potaz, že jsou ražby ovlivňovány kolísáním hydrostatického tlaku způsobeným přílivem a odlivem na řece Temži (obr. 3).

Délka jednoho přílivového a odlivového cyklu je přibližně 12 hodin, což znamená, že v jednom dni se opakují dva cykly, kdy je hladina dvakrát na svém nejnižším bodě a dvakrát na svém maximu. Mezi odlivem a přílivem se hladina řeky Temže obecně změní až o 8 metrů, což způsobuje významné změny tlaku na čelbě přibližně 0,8 bar. Proto musí být podpůrný tlak na razicím stroji neustále sledován a případně upravován. Další záležitostí je časová závislost odeznívání přílivu a odlivu. Ve vrtech poblíž řeky bylo naměřeno zpoždění přibližně půl hodiny. Tento časový dopad byl vyřešen navýšením pórového tlaku vody o 2,5 m v případě nízké hladiny řeky Temže. Navýšení o 2,5 m vytváří při nejnižší hladině řeky Temže vymezený pórový tlak. Tato hodnota se poté používá k výpočtu odpovídajícího teoretického podpůrného tlaku.

Byly vypracovány podrobné provozní tabulky týkající se podpůrného tlaku pro standardní ražbu tunelu, které byly založeny na detailních výpočtech. Pro každou pozici prstence, tudíž pro každý metr tunelu byl

Tunnelling underneath/overpassed sensitive structures

Along the alignment further sensitive structures had to be underpassed (Southern Outfall Sewer, Royal Mail Building and Middlegate House and overpassed (Docklands Light railway Tunnel with approx. 2m clearance). To prevent settlement from the tunnelling operations underneath Cathedral Substation and Middlegate House compensation grouting was designed and implemented independent from the TBM type. White Hart Road Bridge is located west of the main worksite at Plumstead approximately 40m from the launch headwall. To mitigate against settlement caused by tunnelling operations, the foundation of the bridge had to be supported. To strengthen/support the foundation of White Hart Road Bridge, a micro-pile and soil anchor scheme was the preferred method for the underpinning of the bridge.

Tunnelling within tidal influence and underneath River Thames

In this area the pressure variation due to the effects of the tidal River Thames has to be taken into account on the tunnelling (see Figure 3).

Due to the proximity to the sea, the Thames Water Level and therefore the adjacent groundwater level, is highly affected by the tides. The duration of one tide cycle is about 12 hours, meaning that two cycles with two minimum trough and two maximum peaks per day. Between low tide and high tide the Thames Water Level alternates in general up to 8m, causing relevant face pressure changes of approx. 0.8 bar. Therefore the support pressure has to be constantly reviewed and resp. adapted. An additional item is the time dependence of the damping. In the boreholes adjacent to the river the measured delay was approximately 0.5 hour. This time effect will be covered by an increase of the pore water pressure by 2.5m for low Thames Water levels. The increase of 2.5m creates at lowest Thames Water level a confined pore pressure. The damped value is used to calculate the corresponding theoretical support pressure.

Detailed operational tables for the supporting pressure for the regular tunnel drive derived from the detailed calculations have been developed.

Obr. 3 Letecký snímek ražeb pod řekou Temží
Fig. 3 Tunnelling underneath the River Thames

z výpočtů příčných řezů zkompilován a interpolován odpovídající tlak pro tři různé úrovně podzemní vody.

Na základě těchto tabulek se provádí automatický výpočet a příslušná korelace podpůrného tlaku k měřením přílivu a odlivu (znázorněná upravená hladina podzemní vody) v rámci systému řízení procesu ražby a zpracování údajů razicího stroje (Data Process Management System TPC). Následně se zobrazí teoretický podpůrný tlak. Upravená úroveň vody pro výpočet teoretického podpůrného tlaku je omezena na minimálně 99 m nad základní srovnávací rovinou, ačkoli minimální hladina řeky, se kterou se pracuje v projektu, je 96,5 m nad základní srovnávací rovinou. Důvodem je zachovat konzervativní předpoklad. Když je hladina řeky Temže nízko, tak se musí předpokládat, že při ustávání vlivu odlivu může část vody zůstat v zemi, přičemž pórový tlak by byl vyšší, než který by odpovídal skutečné úrovni řeky Temže.

VOLBA RAZICÍHO STROJE

Zadávání kontraktů, kde je předpokládaná ražba razicím strojem, má několik základních specifik.

V případě smluvních podmínek podle žluté knihy FIDIC (Design & Build) dostane zhotovitel pouze data o geologickém prostředí v dané oblasti a na základě toho si musí sám se svým projektantem na jejich vlastní riziko stanovit, jaký razicí stroj použije a jak stanoví měnící se podpůrné tlaky na čelbě (jak zohlední variabilitu podpůrných tlaků). Na základě těchto dat ražbu ocení. V takovém případě pak veškeré riziko spojené se špatnou volbou stroje, případně se špatným odhadem módů ražby v zadaných geologických podmínkách nese zhotovitel a zadavatel nese riziko spojené se špatnou předpovědí geologických podmínek, kterou dal zhotoviteli k dispozici. Někdy může být i v zadávacích podmínkách stanovené, že zhotovitel je povinen si ocenit dodatečný IG průzkum, který si specifikuje podle jím požadovaného rozsahu.

Tento smluvní model se používá většinou v případech, kdy zadavatel nedokáže na svou stranu získat zkušené odborníky a konzultanty, kteří mu umí připravit správné zadání soutěže, případně se používá v případech, ve kterých přichází do úvahy více způsobů technického řešení a je možné předkládat alternativní realizační řešení. Tento model smluvních podmínek se zhotovitelem se také často uplatňuje v kombinaci s projekty PPP, které jsou financovány soukromými subjekty, které nemají tak široké zkušenosti se správným zadáváním kontraktů, navíc také často požadují optimalizaci. V takovém případě nelze příliš navyšovat smluvní cenu, lze provádět navýšení smluvní ceny pouze na základě velice odlišných geologických podmínek oproti zadání.

V případě smluvních podmínek podle červené knihy FIDIC (Design, Bid, Build) si musí zadavatel vybrat natolik zkušeného projektanta, který umí nadefinovat měnící se podpůrné tlaky na čelbě v projektové dokumentaci, dokáže stanovit po trase procentuální rozložení ražeb v uzavřeném/otevřeném módu (polouzavřený mód se zahrnuje do otevřeného) a dokáže stanovit i optimální stroj pro ražbu daného projektu. Příprava takové dokumentace vyžaduje samozřejmě rozsáhlou zkušenost i v projekční sféře. Zadavatel mívá na své straně ještě většinou zkušeného konzultanta, který mu pomáhá zajistit, že zadávací dokumentace je v odpovídajícím rozsahu a kvalitě a umožní správný výběr budoucího zhotovitele. Jedině v takovém případě dokáže zadat kontrakt správně a nemůže docházet k pozdějším sporům. Zhotovitel si potom musí správně ocenit jednotlivé módy ražby, a jelikož se z principu jedná o měřený kontrakt, zhotovitel potom fakturuje módy ražby podle předem vyčíslených položek. V některých případech může zadavatel ponechat volbu stroje na zhotoviteli, nicméně i v takovém případě si musí zhotovitel správně ocenit jednotlivé módy ražby. Cena se potom

For each ring position and resp. tunnelmeter the corresponding pressures for the 3 different water levels have been compiled and interpolated between the calculation cross sections.

Based on those tables an automatic calculation and respective correlation of the support pressure to the tide measurements (illustrated damped water level) within the TBM Data Process Management System TPC takes place. Subsequently the theoretical support pressure is illustrated. The damped water level for the calculation of the theoretical support pressure is capped at a minimum of 99m ATD although the minimum design river water level is 96.5m ATD. The reason for this is to maintain a conservative assumption. During low Thames Water Level we have to assume that, through the damping effect, some water could remain in the ground, whereby the pore pressure would be higher than the actual river level.

TBM MACHINE TYPE SELECTION

Awarding contracts in case of which mechanized tunnelling is expected has several basic particularities.

In case of contractual terms according to FIDIC Yellow Book (Design & Build) the contractor receives only data about geological environment in the given area and on the basis of that it has to determine together with its designer at their own risk which tunnel boring machine it shall use and how it shall determine variations of support pressures at the face and on the basis of this data it has to price the tunnelling. In such a case, all the risks associated with incorrect selection of the machine or wrong estimate of the tunnelling modes in the given geological conditions are borne by the contractor and the contracting authority bears the risk associated with incorrect prediction of the geological conditions that it provided to the contractor. Sometimes, it may even be stipulated within the tender conditions that the contractor is obliged to price additional engineering geological survey, which is specified according to the scope required by it. Such a contractual model is mostly used in those cases when the contracting authority is not able to acquire experienced experts and consultants who can prepare correct tender specifications or it is used in cases when several methods of technical solution are considered and it is possible to submit alternative execution designs. Such a contractual terms model with the contractor is also often used in combination with PPP projects that are funded by private entities that do not have such broad experience with correct contract awarding and, moreover, they often require optimization. In such a case, the contractual price cannot be increased too much; increase of the contractual price can only be made on the basis of extremely different geological conditions compared to the tender documents.

In case of contractual terms according to FIDIC Red Book (Design, Bid, Build), the contracting authority has to choose a designer experienced enough to know how to define in the design documents the variations of the support pressures at the face, who knows how to determine proportional distribution of the tunnelling works in closed/open mode (semi-closed mode is included in the open mode) along the route and who even knows how to determine optimum machine for the tunnelling in the given project. Preparation of such documents evidently requires extensive experience also in the designing field. The contracting authority usually has on its side also an experienced consultant who helps it to secure that the tender documents are in the adequate extent and quality to enable correct selection of the future contractor. Only in such a case, it is able to award the contract correctly and future disputes are avoided. Then, the contractor has to price the individual

Obr. 4 Razicí štít (kombinovaný štít) v továrně Herrenknecht
Fig. 4 Mixshield TBM, factory acceptance

může navyšovat tam, kde je nesoulad očekávaného množství daných oceněných položek se skutečností.

V tomto případě smluvní podmínky umožňovaly jak technologii kombinovaného štítu (Mix Shield), tak zeminového štítu (EPB – Earth Pressure Ballance Shield), nicméně veškeré zadání od projektanta bylo jasně specifikované. Výhody a nevýhody štítu zeminového a štítu s podepřením čelby bentonitovou suspenzí pro tunely pod Temží C310 byly diskutovány až po udělení zakázky.

Jak je uvedeno v předchozí kapitole, v případě projektu C310 muselo být během fáze spuštění razicího štítu zajištěno provozování železniční trati North Kent Line. Kromě toho v oblastech s nízkým nadložím a pod/nad citlivými objekty byly z hlediska řízení rizik ražeb rozhodujícími faktory pro konečný výběr stroje kontrola podpůrného tlaku a následná minimalizace sedání.

Z tohoto důvodu byly budoucím zhotovitelem zkoumány a náležitým způsobem zváženy hlavní kritéria a požadavky na odpovídající výběr nejvhodnějšího typu stroje. Jednalo se zejména o bezpečnost, dodržení rozpočtu/náklady, zabezpečení harmonogramu, minimalizace sedání, vyrovnání se se složitými geologickými podmínkami a variabilitou hydrostatického tlaku (měnícím se podpůrným tlakem z důvodu měnící se hladiny podzemní vody), logistika, zpracování rubaniny, vnější vlivy, předchozí zkušenosti v dané lokalitě a rizika.

Na začátku projektu připravilo sdružení Hochtief – Murphy JV srovnávací posouzení rizik, které vzalo do úvahy výše uvedená kritéria a odpovídající posouzení váhy/vyhodnocení/porovnání různých kritérií v souvislosti s odpovídajícím typem razicího štítu. Kombinovaný štít je sice dražší, ale v celkovém vyhodnocení posouzení rizik překonal zeminový štít, a proto bylo rozhodnuto použít na zakázce C310 tento typ stroje (obr. 4).

Kombinovaný štít (Mix Shield) je navržen speciálně pro očekávané geologické podmínky, a tak se minimalizuje sedání způsobené vlivem ražby a také se zajišťuje neustálá kontrola podpůrného tlaku na čelbě, který může být v reálném čase upravován podle příslušných zaznamenaných úrovní podzemní vody a odpovídajích tlaků vody zmíněných v předchozím odstavci.

Kombinovaný štít je možné použít jako bentonitový (Slurry Shield) nebo pneumatický (Compressed Air Shield).

Vpředu se na stroji nachází řezná hlava, za řeznou hlavou pracovní komora a tlaková komora, které jsou odděleny ponořenou stěnou. Rubanina vystoupá za ponořenou stěnu a polštář ze stlačeného vzduchu na ni vyvine požadovaný tlak tak, aby se průběžně vyrovnaly výkyvy tlaku v této části stroje podle informací z řídicího systému stroje.

tunnelling modes correctly and because it on principle is a re-measured contract the contractor then invoices the tunnelling modes according to the items previously priced. In some cases, the contracting authority may leave the machine selection to the contractor, but even in such a case, the contractor has to price the individual tunnelling modes correctly. Then, the price can be increased where there is a discrepancy between the expected quantity of the given items priced and the reality.

In our case the contract allowed for both Mixshield-and EPB TBM Technology, nevertheless all details were clearly specified by the designer. The advantages and disadvantages of a TBM-S with Earth Pressure Balanced face support (EPB-TBM) and a TBM-S with Slurry Face support (Mix-Shield TBM) for the C310 Thames Tunnels were discussed after contract award.

As described in chapter 3 for the C310 Project disruption to the operation of the North Kent Line had to be assured during the TBM Launching phase. Furthermore for the tunnelling in areas of low overburden underneath sensitive structures the control of support pressure and subsequent minimisation of settlements were decisive factor for the final selection of the TBM from risk management point of view.

The following main criteria and requirements for an appropriate selection of the most convenient TBM Type were investigated and respectively considered (safety, within budget/costs, programme security, settlement minimization, coping with C310 geotechnical conditions, logistics, treatment of spoil e.g. disposal of chalk, interventions, previous experience e.g. DLR Tunnels/CTRL 320 and risks).

HMJV prepared a comparative risk assessment at the beginning of the project which considered the above listed criteria-'s and an appropriate weighting/scoring/comparison of the different criteria's regarding the corresponding TBM Type. Table 1 illustrates and outlines the detailed comparison. A Mixshield TBM is more expensive but in overall scoring of risk assessment has outperformed the EPB TBM and therefore it has been decided to use this type at C310 (see Figure 4).

The TBM finally used on the C310 Thames Tunnel, called a Mixshield TBM, is especially designed for the expected ground conditions which minimise settlements and also ensures a continuous face support control which can be adapted in real-time, to the appropriate monitored water levels and respective water pressures.

A Mixshield TBM can be used as a slurry-shield or a compressed air shield machine.

Located at the front of the TBM is the cutterhead; behind the cutterhead is the pressure chamber, or excavation chamber, which is divided by a submerged wall. The slurry rises behind the submerged wall and a compressed air cushion applies the necessary pressure onto the slurry to compensate for pressure fluctuations in this part of the machine.

The excavated soil is mixed with the slurry and is pumped out at the bottom of the excavation chamber for separation at the slurry treatment plant located outside of the tunnel. For compressed air support, the pressure chamber is partly or fully filled with compressed air.

SPOIL TREATMENT IN CHALK, USE OF FILTERPRESSES

Due to the use of a slurry shield TBM a plant is necessary to filtrate the spoil out of the slurry respectively to recycle it. This task is handled by the STP. To manage the excavated material by a maximum tunnelling advance up to 80mm/min a slurry flow rate of 1600m^3/h needs to be treated. This material consist

Vytěžená zemina se smísí s bentonitovou suspenzí a čerpá se ven ze stroje na dně pracovní komory, dále putuje do separačního zařízení, které se nachází vně tunelu, zde dochází k oddělení suspenze od jemných částic zeminy, a poté se suspenze vrací zpět do tunelu k opětovnému použití. K využití podpory stlačeného vzduchu je tlaková komora buď jen částečně, nebo zcela naplněna stlačeným vzduchem.

ZPRACOVÁNÍ RUBANINY V KŘÍDĚ, POUŽITÍ KALOLISŮ

Vzhledem k použití bentonitového štítu je potřeba zařízení k separaci vytěženého materiálu, respektive jeho recyklaci. Tento úkol je řešen separačním zařízením. Za účelem kontroly množství vytěženého materiálu s uvažováním maximálního postupu ražby až 80 mm/min je nutno zpracovat vytěžený materiál v množství 1600 m³/hod. Tento materiál se skládá z thanetských písků a křídy s proměnlivým obsahem pazourku (5 až 25 %). Zvláště částice vytěžené křídové rubaniny, které jsou až ze 100 % menší velikosti než 40 μm, se v suspenzi rozptýlí natolik, že je zapotřebí provést další zpracování kalolisy. Aby se splnil dohodnutý způsob zpracování a likvidace rubaniny, vlhkost zpracované vytěžené zeminy nesměla překročit hodnotu 35 %.

Separační zařízení se skládá z následujících pěti hlavních částí (obr. 5):

- úsek oddělení hrubšího materiálu, odstranění písku a odkalování;
- zpracování suspenze;
- primární příprava suspenze;
- zpracování vody;
- zpracování přebytečného kalu.

V rotačním válci s integrovaným sítem jakožto separační jednotce se oddělí veškerý materiál o velikosti větší než 8 mm. Tento materiál odpadá přímo na pásový dopravník a je dopravován na skládku vytěženého materiálu.

Veškerá suspenze a zrna, jež se dostaly skrz otvory síta, jsou rozděleny na tři stejné části a shromážděny v příslušných malých

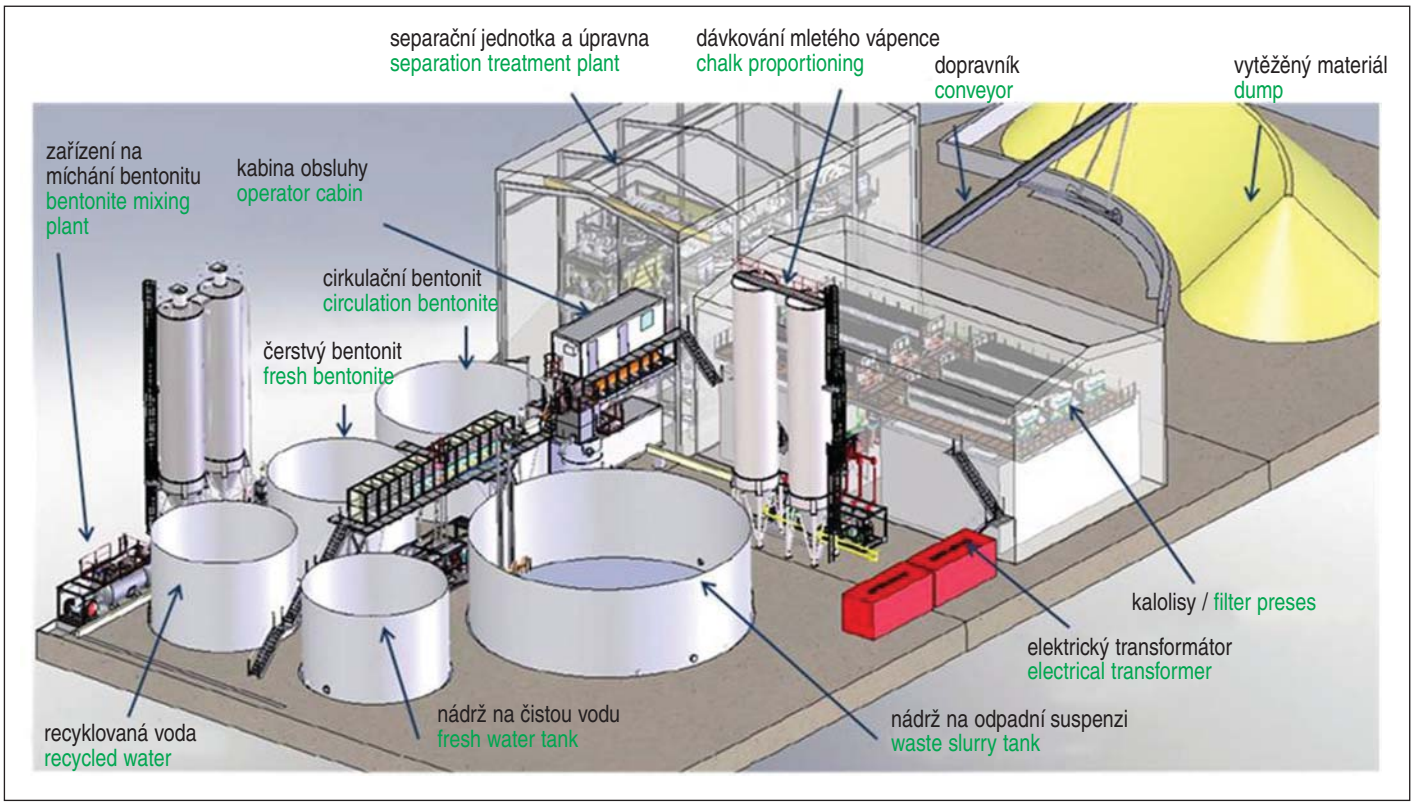
Thanet sands and Chalk with a various amount of flint stones (5 to 25%). Especially the particles of the excavated Chalk spoil, which are up to 100% with smaller 40μm in size, disperse in the slurry and so an additional treatment is carried out by filter presses. To suit the agreed spoil management and disposal, the moisture content of produced spoil from the treatment plant shall not exceed 35%.

The STP consists of the five following principal components (see Figure 5):

- scalping, desanding and desilting section;
- slurry management;
- primary slurry preparation;
- water management;
- treatment of excess mud.

A rotating drum with an integrated screen cuts off all the material with a size bigger than 8mm as a scalping unit. This material drops straight away on a belt conveyor and is transported to the dump.

All the slurry and the grains, which passed the openings in the screen, are split in three equal volumes and collected in respective small tanks. There are three parallel lines including a desanding and desilting section. In each line a centrifugal pump driven by a 132kW electric motor feeds two big cyclones (650mm in diameter) with the slurry out of the intermediate storage tank. The underflow of the cyclones is sent on a dewatering screen, where all the solids cut off the fluids and dropping down on the belt conveyor. The fluids and particles, which passing the openings will be pumped again through the desanding components. The overflow of the cyclones with a size smaller than 70μm feed an additional tank for the desilting section, where a similar process starts, but with 12 smaller cyclones (250mm in diameter) and a cut size of 40μm. The underflows of these cyclones are sent to the dewatering screen as well. One part of the overflow is sent again to the cyclones and the other one is sent by gravity to the slurry management section.



Obr. 5 3D model separačního zařízení
Fig. 5 3D model of Slurry Treatment Plant (STP)

nádržích. Jsou zde tři paralelní linky včetně úseku odstranění písku a odkalování. V každé lince je odstředivé čerpadlo, které je poháněno 132kW elektrickým motorem, jenž napájí dva velké odlučovače (o průměru 650 mm) se suspenzí z meziskladovací nádrže. Nadsítné z odlučovačů se posílá do odvodňovacího síta, kde se všechny pevné látky oddělí od tekutin a padají dolů na pásový dopravník. Tekutiny a částice, které projdou otvory, jsou znovu čerpány skrze zařízení zajišťující odstranění písku.

Podsítné z odlučovačů o velikosti menší než 70 μm zásobuje další nádrž v úseku odkalování, kde začíná podobný proces, ale s 12 menšími odlučovači (o průměru 250 mm) a o oddělovací velikosti 40 μm. Nadsítné z těchto odlučovačů je také posíláno do odvodňovacího síta. Jedna část podsítného je posílána znovu do odlučovačů a druhá je poslána samospádem do úseku zpracování suspenze.

Úsek zpracování suspenze obsahuje několik nádrží na skladování regenerované suspenze, odpadní suspenze, nové (čerstvé) bentonitové suspenze a dvě menší nádrže tak, aby cyklus mohl běžet v různých režimech. S pomocí mnoha senzorů a ventilů programovatelného logického řídicího systému (Programmable Logic Controller/PLC) může úpravna pracovat v automatickém režimu a nastavovat požadované vlastnosti suspenze, která má být poslána zpět do tunelu do pracovní komory.

Po průchodu jednotkou na odstranění písku a kalu je suspenze distribuována tak, aby byla znovu použita v rámci daného cyklu, a to posláním do nádrže na regenerovanou suspenzi, a přebytečná suspenze je uložena v nádrži na odpadní suspenzi. V této nádrži jsou nainstalována dvě míchadla z důvodu zabránění usazování pevných látek.

Posledním krokem v procesu separace je zpracování přebytečné suspenze provedením filtrace na kalolisech. Předtím, než je suspenze přečerpána do komor kalolisů, je přidáno definované množství vápenného mléka. Proto musí být vápno smícháno s vodou a musí vyzrát v přípravné jednotce. Směs vody a vápenného prášku se mísí podobným procesem jako při přípravě čerstvého bentonitu. V závislosti na nastavení koncentrace vápenného mléka, což je možné provést v kabině obsluhy, je vypočítáno požadované množství mléka za použití hodnot odtoku z nádrže odpadního materiálu měřeného pomocí průtokoměru a hustoměru. Vápenné mléko se přidá před odstředivým čerpadlem, to pak přivádí vzniklou směs do dvou skladovacích sil před tím, než je napumpována do kalolisů. Funkcí vápenného mléka ve filtračním procesu je akcelerace samotného procesu a také snížení lepivosti povrchu filtračního koláče, který se při procesu vytváří, za účelem jeho lepšího vypouštění.

Filtrační proces zahrnuje kroky uzavření, plnění, lisování, nafouknutí (pouze u dvou kalolisů), profouknutí, otevření a odstranění filtračního koláče. Je zde šest filtračních lisů s tím, že každý umožňuje zpracování 14,5 t/h odvodněného materiálu. Čtyři z nich jsou normální komorové kalolisy s maximálním tlakem až 250 bar vyvýjeným dvěma hydraulickými jednotkami.

Další dva jsou membránové komorové kalolisy, které po normálním procesu plnění využívají dalšího procesu stlačování nafouknutí. Díky tomuto dalšímu procesu je tlak mnohem vyšší, až 400 bar. Zpracování nadbytečného odpadového materiálu začíná uzavřením 100 komor kalolisů, po kterém následuje plnění. Tak je objem přibližně 7300 litrů směsi vypumpován ze skladovacího sila do komor kalolisů. Pevné částice suspenze ulpívají na povrchu filtrační plachetky a vytvářejí takzvaný filtrační koláč a zbytek protéká skrze koláč a plachetku do filtračních desek, kde je odvedena skrze malé drenážní kanálky zpět do nádrže. V důsledku zvyšující se tloušťky filtračního koláče tlak vystoupá až na 7 bar. Při této nastavené hodnotě tlaku jsou plnicí čerpadla upravena tak, aby tento tlak udržela po určitou dobu,

The section of slurry management includes some tanks to store the regenerated slurry, the waste mud, the main bentonite, a distribution box and two smaller tanks to run the circle in different modes. With the help of many sensors, valves and the Programmable Logic Controller (PLC) the plant can run in automatic mode to set the required properties of the slurry, which should sent to the excavation chamber.

After passing the desanding and desilting section the slurry will be distributed to be reused in the slurry circuit by sending to the regenerated slurry tank and the excess slurry is stored in a waste mud (waste slurry) tank. To prevent sedimentation of the solids two agitators are installed in this tank.

The last separation step is the treatment of this waste mud by carrying out a filtration process with the filter presses. Before the slurry will be pumped into the chambers of the filter presses, a defined amount of lime milk will be added. Therefore lime powder needs to be mixed and maturated in a preparation unit. Lime milk consists of water and lime powder and is mixed in a similar process like the main bentonite preparation. Depending on the settings for lime milk concentration and lime dosage, which can set in the operators cabin, the required amount of milk will be calculated utilizing the values of outflow of waste mud tank measured by a flow- and densimeter. The lime milk is added in front of a centrifugal pump, which feeds the limed mud into two storage silos, before pumping into the filter presses. The purpose of lime milk for the filtration process is to accelerate the process itself and also to reduce the stickiness of the filter cake surface to improve the discharge of the filter cakes.

The filtration process includes the steps of closing, feeding, inflating (only two filter presses), core blast, opening and demoulding. There are six filter presses, where each allows a treatment of 14.5t/h of dry mud. Four of them are normal chamber filter presses with a maximum closing pressure up to 250 bar, supplied by two hydraulic jacks. Another two are membrane chamber filter presses, which using after the normal feeding process an additional squeezing/inflating process. Due to this additional process, the closing pressure is with 400 bar much higher. The excess mud treatment starts with the closing of the 100 chambers of a filter press and is followed by the mud feeding. Thereby a volume of approximately 7300 litres of limed mud out of the storage silo is pumped into the chambers. The solid particles in the slurry collecting on the surface of the filter cloth and creating so called filter cake. At the same time the water flows through the cake and the cloth into the plates, where it led via small channels to a drain into a tank. In consequence of the increasing thickness of filter cake, the pressure goes up to 7 bar. At this pressure set-point the feeding pumps are regulated to hold that pressure for a certain time until the filtration process is finished. Before the core blast sequence starts, the inflating mode is carried out by the two membrane filter presses. During this mode the volume of the chamber is reduced by inflating membranes in the plate's utilization 14 bar water pressure. Due to this compression residual water contained in the cake is removed. The pressure is held over a certain time until the process is end by a required criterion. After finishing this mode respectively following the feeding process (filter presses without membranes) the liquid core in the presses needs to be removed. This is necessary to prevent the liquid mud falling down on the dry filter cakes. Therefore compressed air is passed through the centre of the filter press to discharge the material into a small tank, where it is pumped back to the limed mud silo. Before the hydraulic pressure is released

dokud není filtrační proces dokončen. Předtím, než začne krok profouknutí, jsou nafouknuty membrány v membránových kalolisech. Během tohoto režimu je objem komory snížen nafouknutím membrán až na tlak 14 bar. Díky tomuto stlačení je zbytková voda obsažená v koláči odstraněna. Tlak je udržován po určitou dobu, dokud není proces ukončen dosažením požadovaného kritéria. Po dokončení tohoto režimu musí být tekuté jádro v lisech odstraněno. To je nezbytné, aby se zabránilo padání tekuté hmoty na odvodněné filtrační koláče. Proto je střed filtračního lisu profouknut stlačeným vzduchem, aby se tekutá hmota vypustila do malé nádrže, kde je vyčerpána zpět do nádrže materiálu připraveného k odvodnění v kalolisech. Předtím, než je hydraulický tlak uvolněn, aby se umožnilo otevření filtračních desek, se membrány odvodní. Poté je v definovaném pořadí stlačený vzduch tlačen do hydraulických zvedáků na obou stranách mezi deskami, aby se poskytl dostatek prostoru pro klesání desek. Koláče vypadnou pomocí gravitace s podporou vibrace desek. Koláče padají do připravených kontejnerů, kde mohou být vyzvednuty kolesovým nakladačem, smíchány s materiálem z pásového dopravníku a naloženy na nákladní vůz (obr. 6).

Obr. 6 Letecký pohled na separační zařízení
Fig. 6 Slurry Treatment Plant

ZÁVĚR

Projekt C310 rozšířil významným způsobem zkušenosti zaměstnanců a expertů společnosti Hochtief (zde ve sdružení Hochtief – Murphy) v oblasti ražby tunelů mechanizovanou ražbou. Po ražbě Gotthardského bázového tunelu horninovými razicími stroji s extrémně vysokým nadložím, což byl svým způsobem ojedinělý projekt světového rozměru, přes několik desítek kilometrů vyražených tunelů zeminovými a bentonitovými štíty v poměrně předvídatelných podmínkách v různých koutech světa, zde přišla příležitost získat zkušenost s mechanizovanou ražbou v naprosto odlišném a velice složitém geologickém prostředí, kde bylo třeba se vypořádat s rychle se měnícím tlakem na čelbě stroje, udržet hodnoty poklesů terénu vlivem ražby na minimálních hodnotách z důvodu možnosti silného dopadu na chráněné existující objekty v okolí a vypořádat se s náročným procesem úpravy a separace vytěženého materiálu. Zhotovitel předal kompletní dílo dle stanoveného harmonogramu, v požadované kvalitě a s dodržením plánovaného rozpočtu stavby.

RIKU TAURIAINEN, riku.tauriainen@hochtief.de,
HOCHTIEF Infrastructure GmbH,
RAINER RENGSHAUSEN,
rainerrengshausen@murphygroup.co.uk,
ANDREAS RAEDLE,
andreasraedle@murphygroup.co.uk, HMJV

Recenzovali / Reviewed: Ing. Otakar Hasík, Ing. Martin Srb

to allow an opening of the plates the membranes get drained. Then in a defined order compressed air is pushed in hydraulic jacks on both sides between the plates to provide enough space for dropping of the cakes. The discharge of the cakes is done by gravity and supported by shaking of the plates. The cakes falling down in a provided box, where they can be collected with a wheel loader, mixed up with material from the belt conveyor and loaded on a lorry (See Figure 6).

CONCLUSION

The Project C310 significantly widened experience of employees and experts of the company Hochtief (in this case, in a joint venture Hochtief – Murphy) in the field of mechanized tunnelling. After tunnelling the Gotthard Base Tunnel by the rock tunnel boring machines with extremely high overburden, which was in its way a unique project of global importance, together with several tens of kilometres of the tunnels driven by EPB and SPB shields in relatively predictable conditions all around the world, this was a unique opportunity to gain experience with mechanized tunnelling in completely different and very complicated geological environment where it was necessary to compensate for rapid pressure fluctuations at the machine's head and to maintain values of subsidence caused by the tunnelling at minimum values due to possibility of strong impact on the existing protected buildings in the vicinity. The contractor handed over the completed Work within the time schedule set, in the required quality and in compliance with the construction's budget planned.

RIKU TAURIAINEN, riku.tauriainen@hochtief.de,
HOCHTIEF Infrastructure GmbH,
RAINER RENGSHAUSEN,
rainerrengshausen@murphygroup.co.uk,
ANDREAS RAEDLE,
andreasraedle@murphygroup.co.uk, HMJV

LITERATURA / REFERENCES

CIRIA 574: Engineering in Chalk
WITTKE, W. *Stability Analysis and Design for mechanized Tunnelling*. Translated from the German edition: *Statik und Konstruktion maschineller Tunnelvortriebe*. Geotechnik in Forschung und Praxis. WBI-PRINT 6, Essen: VGE-Verlag Glückauf, 2006
MAIDL, B., HERRENKNECHT, M., ANHEUSER, L., WEHRMAYER, G. *Machanised Shield Tunneling*. 2nd Edition, Berlin: Ernst & Sohn (in German), 2011
CROSSRAIL (May 2007): *Geotechnical Sectional Interpretative, Report 4: Isle of Dogs to Plumstead, Volume 1: Text*. Report No. 1D0101-G0G00-00520, Rev. B